
**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ
В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЛОЯХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ
HFE-7100 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ¹**

© 2025 г. А. Е. Брестер^{a, b, *}, Д. А. Швецов^{a, b}, В. И. Жуков^{a, b}, А. Н. Павленко^a

^a*Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе,
просп. Академика Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090 Россия*

^b*Новосибирский государственный технический университет,
просп. К. Маркса, д. 20, г. Новосибирск, 630073 Россия*

^{*}*e-mail: brester94@gmail.com*

Поступила в редакцию 12.06.2024 г.

После доработки 23.08.2024 г.

Принята к публикации 29.08.2024 г.

Представлены экспериментальные данные по теплообмену при пузырьковом кипении диэлектрической жидкости HFE-7100 в горизонтальных слоях. Высота слоя жидкости изменялась в широком диапазоне при варьировании давления в рабочей камере. Исследование проводилось на горизонтальной плоской поверхности образца из нержавеющей стали диаметром 120 мм на экспериментальной теплообменной вакуумной установке, рабочая камера которой представляет собой термосифон. Выполнено сравнение экспериментальных данных с расчетными зависимостями Ягова и Гогонина, которые были получены для процесса кипения в большом объеме. Показано, что расчетная зависимость Гогонина хорошо обобщает экспериментальные данные во всех диапазонах приведенного давления и высоты слоя жидкости. В зависимости Гогонина в явном виде учитывается влияние таких параметров, как шероховатость поверхности нагрева, соотношение теплофизических свойств жидкости и теплоотдающей стенки, от которых существенно зависит коэффициент теплоотдачи при кипении диэлектрических жидкостей. Кроме того, данная зависимость удобна тем, что ее можно применять с использованием параметров, доступных для контроля в ходе эксперимента. Представлено обобщение экспериментальных данных с помощью эмпирической зависимости Пиоро, рекомендованной для обобщения данных при пузырьковом кипении в тонких слоях жидкости. Показано, что при тщательном подборе коэффициентов и степеней с помощью зависимости Пиоро можно с приемлемой точностью обобщить экспериментальные данные, полученные в заданных условиях на теплоотдающей стенке, омываемой рабочей жидкостью. Для количественной оценки корреляции расчетных зависимостей и экспериментальных данных, полученных при пузырьковом кипении в горизонтальных слоях диэлектрической жидкости HFE-7100, использовали среднюю ошибку и среднеквадратическое отклонение.

Ключевые слова: диэлектрическая жидкость HFE-7100, тонкий слой жидкости, теплообмен, кипение, приведенное давление, теплообменная вакуумная установка, средняя ошибка, среднеквадратическое отклонение

DOI: 10.56304/S0040363624700590

Процесс кипения является эффективным способом охлаждения нагретых поверхностей в технических устройствах (термосифонах, паровых камерах, тепловых трубах различного назначения и т.д.). В настоящее время процесс кипения диэлектрических жидкостей активно изучается как способ охлаждения элементов микроэлектроники и микрочипов, в частности при иммерсионном двухфазном охлаждении, благодаря тому, что

при фазовом переходе жидкость – пар происходит отвод больших тепловых потоков при малой разнице температур между нагретой поверхностью и жидкостью.

Иммерсионное двухфазное охлаждение является сравнительно недорогим методом, поскольку для него не требуется сложной системы циркуляции охлаждающей жидкости и, соответственно, трудоемкого технического обслуживания [1–3]. Кроме того, это один из наиболее эффективных способов снижения энергопотребления при охла-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00245 от 15.05.2023).

ждении [4]. Применение тонких слоев жидкости позволяет сократить расход теплоносителя и уменьшить массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов. В настоящее время исследования, направленные на изучение теплообмена при кипении часто используемой диэлектрической жидкости HFE-7100, выполнялись в большом объеме главным образом в процессе экспериментов. В связи с этим получение данных по теплообмену при кипении в тонких горизонтальных слоях диэлектрической жидкости HFE-7100, а также построение обобщающих зависимостей для таких данных являются весьма актуальными.

В работе [5] проведено обобщение экспериментальных данных, полученных для органической жидкости (*n*-додекан) при испарении/кипении в широком диапазоне высот слоя жидкости и приведенных давлений. Давление *p* варьировалось от 67 Па ($p/p_{cr} = 3.68 \times 10^{-5}$) до 20 кПа ($p/p_{cr} = 0.011$) (здесь p_{cr} – критическое давление) при высотах слоя *n*-додекана *h* (h/l_{σ}), где l_{σ} – капиллярная постоянная: 1.7 мм (0.99), 2.5 мм (1.45), 4.0 мм (2.32), 10.0 мм (5.81), 20.0 мм (11.61), 40.0 мм (23.22) ($l_{\sigma} = 1.78$ мм при $p = 133$ Па, $T_s = 325.07$ К, где T_s – температура насыщенных паров). В [5] показано, что в области низких приведенных давлений $p/p_{cr} \leq 0.001$ экспериментальные данные, полученные при высоте слоя *n*-додекана менее 10 мм ($h/l_{\sigma} = 5.81$), хорошо согласуются с теоретической зависимостью Ягова. В тонких пленках *n*-додекана при низких приведенных давлениях не наблюдалось пузырькового кипения, а теплообмен осуществлялся преимущественно благодаря испарительной составляющей [6].

Расчетная зависимость Ягова имеет следующий вид [7, 8]:

$$\alpha = 0.07 \left[1 + \frac{h_{LG} \Delta T}{2 \times 10^3 \frac{R}{M} T_s^2} \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\lambda_L^2 q^2}{v_L \sigma T_s} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left[1 + \sqrt{1 + 800 \frac{h_{LG} (\rho_V v_L)^{\frac{3}{2}}}{\sigma (\lambda_L T_s)^{\frac{1}{2}}}} + 400 \frac{h_{LG} (\rho_V v_L)^{\frac{3}{2}}}{\sigma (\lambda_L T_s)^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; h_{LG} – скрытая теплота парообразования; ΔT – температурный напор; R – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса; λ_L – коэффициент теплопроводности жидкости; q – тепловой поток; v_L – кинематический коэффициент вязкости жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения; ρ_V – плотность пара.

Данная зависимость является результатом развития направления исследований теплообмена при пузырьковом кипении, проведенных Лабунцовым [9], который рассматривал теплообмен через тонкий слой жидкости, остающийся на поверхности нагрева под областью слившихся пузырей в режиме развитого пузырькового кипения. Вследствие малой эффективной толщины этого тонкого слоя перенос тепла через него осуществляется главным образом теплопроводностью, в результате чего значительно увеличивается коэффициент теплоотдачи. Лабунцов предполагал, что толщина этого тонкого слоя уменьшается при снижении вязкости жидкости, увеличении интенсивности парообразования и плотности центров парообразования (точек разрыва тонкого слоя жидкости) на поверхности кипения. Ягов [7, 8] получил зависимость (1), в которой тепловой поток состоит из двух частей: одна – конвективная часть, а другая – тепловой поток, обусловленный испарением жидкости на границах сухих пятен.

В работе [5] установлено, что при увеличении высоты слоя *n*-додекана более 10 мм ($h/l_{\sigma} = 5.81$) в области низких приведенных давлений $p/p_{cr} \leq 0.001$ значение коэффициента теплоотдачи уменьшается и экспериментальные данные приближаются к расчетным значениям, полученным по полуэмпирической зависимости Гогонина [10]. Также в области умеренных приведенных давлений $0.001 < p/p_{cr} < 0.05$ независимо от высоты слоя все экспериментальные данные хорошо обобщаются теоретической расчетной зависимостью Гогонина [10]:

$$Nu^* = 0.01 Re_*^{0.8} Pr^{1/3} K_t^{0.4} \bar{R}_z^{0.2} b \left(\frac{\lambda_L c_{pL} \rho_L}{\lambda_W c_{pW} \rho_W} \right)^{-0.2}, \quad (2)$$

где Nu^* – число Нуссельта;

$$Re_* = \frac{q l_{\sigma}}{h_{LG} \rho_V v_L}$$

– число Рейнольдса;

$$K_t = \frac{(h_{LG} \rho_V)^2 l_{\sigma}}{T_s \sigma c_{pL}} = \frac{l_v}{R_{cr}} Ja^{-1} Ka^{1/6}$$

– критерий теплового подобия; c_p – удельная теплоемкость; ρ_L – плотность жидкости; l_v – вязкостно-гравитационная постоянная жидкости; R_{cr} – критический радиус парового зародыша; Ja – число Якоба; Ka – число Капицы; $\bar{R}_z = R_z/l_v$ – безразмерный критерий шероховатости; R_z – наибольшая высота профиля поверхности; λ_W , c_{pW} , ρ_W – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность металла,

из которого изготовлено устройство, на поверхности стенки которого происходит кипение; $(\lambda_L c_{pL} \rho_L) / (\lambda_W c_{pW} \rho_W)$ – комплексный критерий;

$$\text{Pr} – \text{число Прандтля}; b = \left[1 + 10 \left(\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V} \right)^{2/3} \right] –$$

безразмерный комплекс.

За основу Гогонин принял зависимость Лабунцова [9], которую в работе [11] привел в критериальном виде:

$$\text{Nu}^* = b \text{Re}_*^{2/3} K_i^{1/3} \text{Pr}^{1/3}. \quad (3)$$

Гогонин [10] обобщил данные, полученные при кипении фреонов и азота на поверхностях при различных параметрах, таких как шероховатость и материал стенки, модифицировав зависимость Лабунцова (3).

В формуле (2) влияние давления учитывается в неявном виде критерием теплового подобия K_i и безразмерным комплексом b . Критерий теплового подобия включает в себя критический радиус парового зародыша, который зависит от давления. Кроме того, число Якоба также учитывает влияние давления, поскольку в нем присутствуют плотность пара и температура насыщенных паров рабочей жидкости. Показатели степени для числа Рейнольдса и критерия теплового подобия имеют большие значения, чем в зависимости (3), и равны 0.8 и 0.4 соответственно. Также было показано, что влияние на теплообмен при кипении комплексного критерия, учитывающего теплофизические свойства теплоотдающей поверхности, и безразмерного критерия шероховатости весьма существенно. В результате Гогонин дополнил соотношение (3) безразмерными параметрами, характеризующими свойства теплоотдающей стенки.

Кроме того, в работе [5] на основе эмпирической зависимости Пиоро [12–15] была получена обобщающая формула для расчета коэффициентов теплоотдачи при испарении/кипении n -додекана с приемлемой точностью. В работах [12–15] исследовался теплообмен в слоях жидкости различной высоты на горизонтальной плоской поверхности образца размером 411×51 мм в двухфазном термосифоне при пузырьковом кипении. Эксперименты с водой и этанолом проводились на поверхности нагрева из алюминия при уровне рабочей жидкости 2.4 мм. Для воды температура насыщения изменялась от 3.5 до 103°C , температурный напор – в диапазоне $5\text{--}22^\circ\text{C}$, тепловой поток – от 140 до 655 кВт/м^2 . На поверхностях образцов из бронзы, меди и нержавеющей стали выполняли исследования с водой, этанолом, R-113 и R-11, уровень которых составлял 2.4–5.8 мм. Пи-

оро в [12–15] предложил следующую эмпирическую расчетную зависимость, которая содержит параметры n и C_{cf}^* :

$$\frac{\alpha l_\sigma}{\lambda_L} = C_{cf}^* \left\{ \frac{q}{h_{LG} \rho_V^{0.5} [\sigma g (\rho_L - \rho_V)]^{0.25}} \right\}^{2/3} \text{Pr}^n, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения.

Для числа Прандтля значение показателя степени n , зависящего от природы рабочей жидкости, изменялось от -1.1 до -3.3 [12]. Постоянная C_{cf}^* , с помощью которой, по мнению автора, учитываются характеристики различных сочетаний параметров системы жидкость – поверхность нагрева, имеет различные значения и определяется экспериментально. Для некоторых комбинаций жидкость – поверхность эти значения представлены в работе [12], в которой приводятся обобщающие зависимости для кипения воды в тонких слоях, органических жидкостей и фреонов в широком диапазоне давления.

Целью данной работы являлось получение и обобщение экспериментальных данных по теплообмену при кипении в горизонтальных слоях диэлектрической жидкости HFE-7100 в широких диапазонах изменения высоты слоя при различных давлениях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводились на экспериментальной установке (рис. 1), подробное описание которой приведено в [16, 17]. Рабочая камера выполнена в виде цилиндрического сосуда из стали 12Х18Н10Т, стенки которого имеют толщину 1 мм. Внутренний диаметр рабочей камеры составляет 120 мм, высота – 300 мм. Нагрев dna осуществляется трубчатым электронагревателем мощностью 3 кВт. Медная пластина толщиной 30 мм, расположенная между электронагревателем и дном рабочей камеры, служит для равномерного распределения теплового потока, направленного к поверхности нагрева. Для измерения тепловых потоков в дне рабочей камеры параллельно поверхности нагрева на различной высоте просверлено пять отверстий диаметром 1.5 мм, в которые вставляются медьконстантановые термопары в нержавеющей капиллярах. Зазор между дном и медной пластиной заполнен специальной пастой, имеющей высокую теплопроводность. Камера охлаждается водой, протекающей по змеевику, расположенному на наружной поверхности верхней части рабочей камеры. Ниже змеевика охлаждения находится дополнительный змеевик для нагрева нижней части рабочей камеры до температуры насыщения рабочей жидкости с целью уменьшить тепловые потери нагревателя из-за

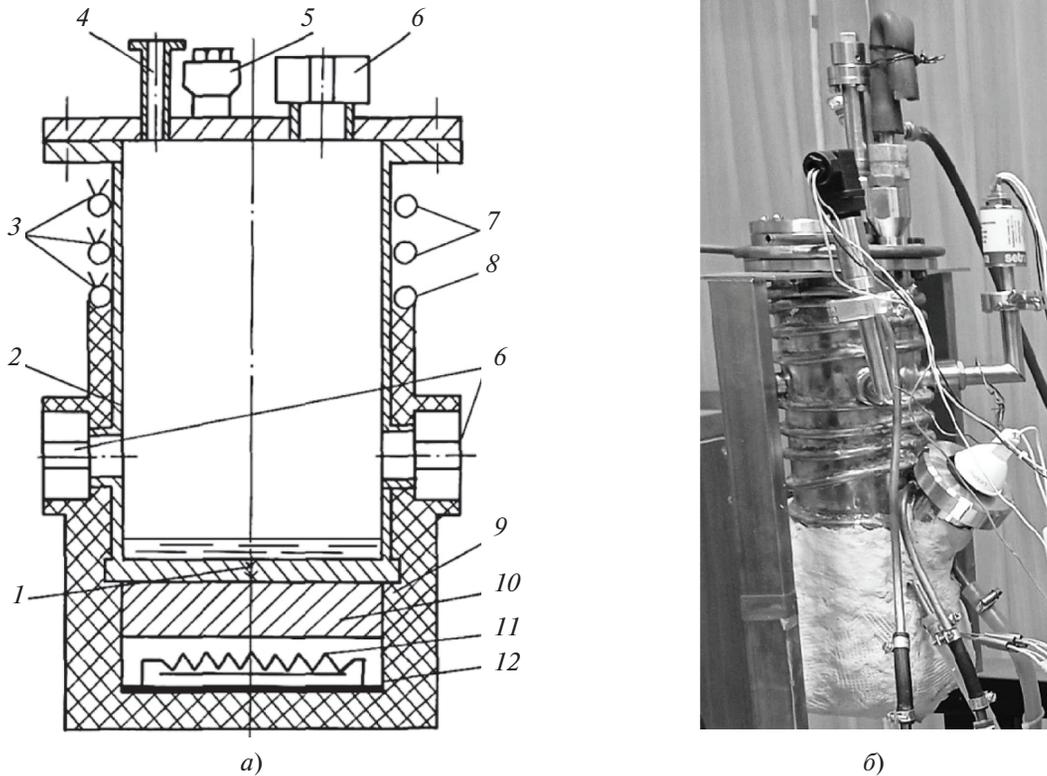


Рис. 1. Схема (а) и фотоснимок (б) экспериментальной установки.

1 – термопары для измерения температуры дна камеры; 2 – корпус; 3 – термопары для измерения температуры охлаждающей воды; 4 – патрубок для крепления системы откачки и измерения давления; 5 – вакуумный ввод; 6 – смотровые окна; 7, 8 – змеевик охлаждения и нагрева; 9 – слой теплоизоляции; 10 – медная пластина; 11 – электронагреватель; 12 – кожух электронагревателя

перетечек по стенкам рабочей камеры от нагревателя к змеевику охлаждения. Рабочая камера оборудована окнами для визуального наблюдения процессов. Нагреватель и рабочая камера в нижней части покрыты теплоизоляцией.

Тепловой поток рассчитывали по уравнению Фурье с применением температурного градиента, измеренного вдоль центральной линии по толщине дна рабочей камеры, с использованием линейной аппроксимации выходного сигнала пяти термопар:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (5)$$

где x – расстояние, на котором располагаются термопары по толщине дна рабочей камеры, м.

Температуру поверхности нагрева T_w экстраполировали по показаниям пяти термопар методом наименьших квадратов с использованием модели линейной регрессии:

$$T = T_w + \frac{\partial T}{\partial x} x. \quad (6)$$

Температурный напор ΔT определяли как разность между температурой поверхности нагрева

T_w и температурой насыщенных паров T_s . Приборная неопределенность измерения давления составляла $\pm 0.2\%$ общей шкалы.

Неопределенность измерения температуры поверхности стенки ΔT_w складывалась из приборной неопределенности измерения температуры термопарой $\pm 0.3^\circ\text{C}$ и неопределенности измерения значения градиента температур, выражаемой остаточной дисперсией для вычисления параметра T_w из формулы (6). Расчет неопределенности измерения температуры поверхности нагрева проводили по формуле $\Delta T_w = \sqrt{(\theta_{\text{пр}})^2 + (\sigma_{T_w})^2}$, где $\theta_{\text{пр}}$ – приборная неопределенность измерения температуры термопарой; σ_{T_w} – остаточная дисперсия для расчета параметра T_w по градиенту температур (6).

Суммарная неопределенность измерения температуры поверхности нагрева не превышала $\pm 0.6^\circ\text{C}$.

Неопределенность измерения разности $\delta(\Delta T)$ между температурой поверхности нагрева и тем-

Таблица 1. Теплофизические свойства диэлектрической жидкости HFE-7100

Показатель	Рабочее давление, кПа		
	150	100	50
T_s , К	347	334	314
ρ_L , кг/м ³	1390	1419	1474
ρ_V , кг/м ³	12.004	9.006	4.789
h_{LG} , Дж/кг	1.096×10^5	1.117×10^5	1.145×10^5
ν_L , м ² /с	2.724×10^{-7}	3.011×10^{-7}	3.751×10^{-7}
σ , Н/м	9.03×10^{-3}	9.945×10^{-3}	0.012
λ , Вт/(м · К)	0.060	0.062	0.066
c_p , Дж/(кг · К)	1275	1255	1215

пературой насыщения рассчитывали по следующей формуле:

$$\delta(\Delta T) = \sqrt{(\Delta T_w)^2 + (\Delta T_s)^2}, \quad (7)$$

где ΔT_s – неопределенность измерения температуры насыщенных паров жидкости.

Относительная неопределенность измерения этой разности температур $\delta(\Delta T)/\Delta T$ не превышала $\pm 7\%$.

Коэффициент теплопроводности стали 12X18H10T и его абсолютную погрешность вычисляли по формуле, принятой в [18]:

$$\lambda = 10 \pm 0.47 + (0.0164 \pm 0.2 \times 10^{-3}) T_w. \quad (8)$$

Для расчета неопределенности измерения теплового потока Δq применяли следующую формулу:

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial \lambda} \Delta \lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial \frac{\partial T}{\partial x}} \Delta \frac{\partial T}{\partial x}\right)^2}, \quad (9)$$

где $\Delta \lambda$ – неопределенность измерения коэффициента теплопроводности, полученная с использованием (8); $\Delta(\partial T/\partial x)$ – остаточная дисперсия для вычисления градиента температуры $\partial T/\partial x$.

Относительная неопределенность измерения теплового потока $\Delta q/q$ не превышала $\pm 14\%$.

Для расчета коэффициента теплоотдачи применяли следующее соотношение:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T}. \quad (10)$$

Неопределенность измерения коэффициента теплоотдачи рассчитывали по формуле

$$\Delta \alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \Delta q\right)^2 + \left[\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta T} \delta(\Delta T)\right]^2}. \quad (11)$$

Относительная расчетная неопределенность измерения коэффициента теплоотдачи $\Delta \alpha/\alpha$ при плотности теплового потока более 100 кВт/м² не превышала 15%.

В качестве рабочей жидкости был выбран метоксинонафторбутан $C_4F_9OCH_3$ – углеводород торговой марки 3M™ Novac™ 7100 (HFE-7100). Теплофизические свойства HFE-7100, представленные в табл. 1, рассчитывались согласно данным, приведенным в [19–21].

Перед началом экспериментов на дно рабочей камеры заливали рабочую жидкость, которую в течение продолжительного времени тщательно дегазировали путем кипячения при пониженном давлении. В ходе экспериментов получали стационарные режимы теплообмена, при которых регистрировали температуры по толщине обогреваемой стенки и давление над слоем жидкости в рабочей камере, а также проводили видеосъемку процесса высокоскоростной видеокамерой. В экспериментах получали кривые кипения при давлении над слоем жидкости 50 ($p/p_{cr} = 0.022$), 100 ($p/p_{cr} = 0.045$) и 150 кПа ($p/p_{cr} = 0.067$) и высотах слоя жидкости h (h/l_c) равных 1.5 (1.88), 2.5 (3.12), 6.0 (7.50), 10 (12.50), 16 (20.00), 25 (31.25), 35 мм (43.75). Значение капиллярной постоянной l_c для HFE-7100 при атмосферном давлении составляло 0.8 мм.

Все эксперименты проводили на плоской горизонтальной поверхности образца из нержавеющей стали шероховатостью $R_a = 0.62$ мкм ($R_z = 3.2$ мкм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов теплоотдачи от теплового потока, полученные при кипении диэлектрической жидкости HFE-7100 на поверхности из нержавеющей стали. Из рисунка следует, что зависимость Гогонина (линия 9) хорошо коррелирует с эксперимен-

тальными данными для горизонтальных слоев HFE-7100 во всем диапазоне давлений и высот слоя жидкости, поскольку она, по-видимому, учитывает теплофизические свойства теплоотдающей стенки и шероховатость поверхности кипения. Кроме того, эта зависимость рассчитывается с использованием параметров, доступных для контроля в ходе эксперимента.

Вероятно, на гладкой поверхности высота слоя жидкости слабо влияет на количество активных центров парообразования (рис. 3). Незначительное различие в интенсивности теплоотдачи при различных высотах слоя жидкости объясняется разницей в особенностях движения паровых пузырей и отрыва их от поверхности нагрева, как было показано в работах [6, 22].

Наибольшие отклонения от расчетной зависимости (линия 9) имеют экспериментальные данные, полученные при низких тепловых потоках, когда наблюдаются режим одиночных пузырей и большой разброс опытных данных при различной высоте слоя, а также при высоких тепловых потоках, соответствующих предкризисному режиму. Уже в слое высотой 1.5 мм при низких плотностях теплового потока ($q \approx 3 \text{ кВт/м}^2$) возникало сухое пятно в центре поверхности. Очевидно, что именно это даже при самой малой высоте слоя приводило к резкому увеличению разности температур при незначительном росте тепловой нагрузки.

Зависимость Ягова (линия 8) лежит несколько выше экспериментальных данных (см. рис. 2), полученных при всех диапазонах высоты слоя жидкости и давления, что также подтверждается расчетом средней ошибки.

Для количественной оценки корреляции значений α_{pred} , рассчитанных по модели, с экспериментальными данными α_{exp} использовали среднюю ошибку *MAError*, вычисляемую по формуле

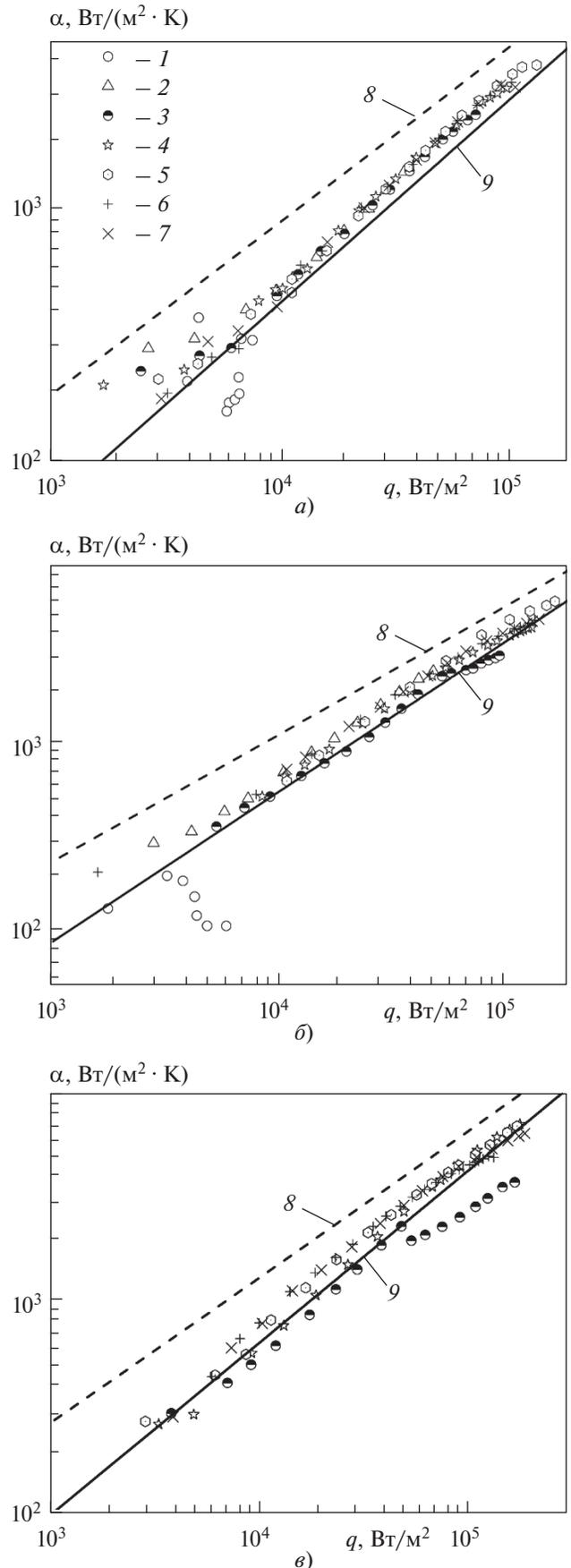
$$MAError = \sum_{i=1}^n \frac{Error_i}{n}, \quad (12)$$

где *Error* – ошибка, которую можно найти по следующему соотношению:

$$Error = \frac{\alpha_{pred} - \alpha_{exp}}{\alpha_{exp}}. \quad (13)$$

Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от теплового потока q при кипении диэлектрической жидкости HFE-7100 на поверхности из нержавеющей стали при давлении в рабочей камере 50 (а), 100 (б) и 150 кПа (в) в сравнении с результатами расчета по зависимостям (1) (8) и (2) (9).

h (h/l_0), мм: 1 – 1.5 (1.88); 2 – 2.5 (3.12); 3 – 6.0 (7.50); 4 – 10.0 (12.50); 5 – 16.0 (20.00); 6 – 25.0 (31.25); 7 – 35.0 (43.75)



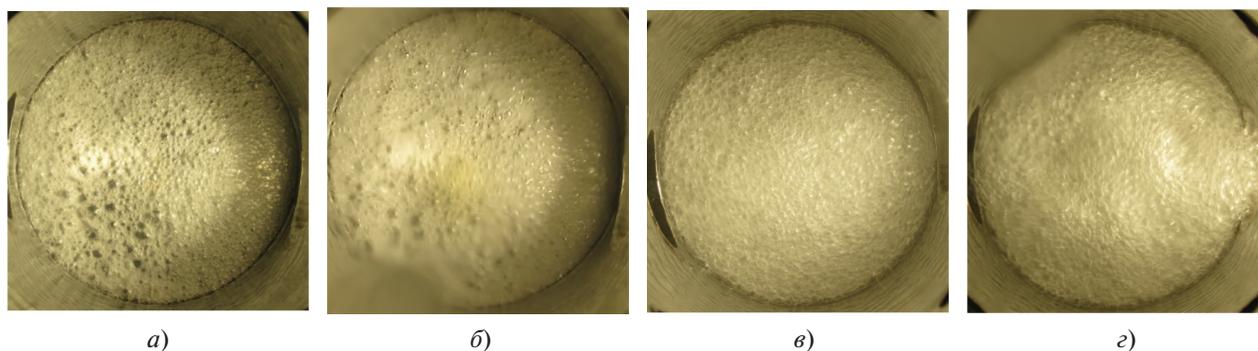


Рис. 3. Фотоснимки процесса кипения диэлектрической жидкости HFE-7100 при давлении 100 кПа.
 h , мм: $a - 2.5$; $б - 6.0$; $в - 16.0$; $г - 35.0$; q , кВт/м²: $a - 50.34$; $б - 55.10$; $в - 48.70$; $г - 47.57$; ΔT , К: $a - 20.6$; $б - 24.1$; $в - 21.0$; $г - 20.7$

Кроме средней ошибки в работе определяли среднеквадратическое отклонение $RMSError$, которое, в отличие от средней ошибки, принимает исключительно положительные значения и показывает, насколько экспериментальные данные, описывающие изучаемые процессы, отличаются от значений, вычисленных по расчетным зависимостям. Среднеквадратическое отклонение рассчитывали по формуле

$$RMSError = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{Error_i^2}{n}} \quad (14)$$

В табл. 2 представлены значения средней ошибки (12) и среднеквадратического отклонения (14) коэффициентов теплоотдачи, определенных по зависимостям Гогонина и Ягова, от полученных экспериментально.

Эмпирическая зависимость Пиоро (4) имеет переменный параметр C_{sf} и показатель степени n для числа Прандтля, при соответствующем подборе которых ее автор достигал обобщения получаемых экспериментальных данных единой

расчетной зависимостью. При выводе данной зависимости Пиоро предположил, что верхним пределом пузырькового кипения является кризис кипения, характеризующийся предельными значениями коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока, рассчитанного по формуле Кутателадзе [23].

В работе [12] предполагалось, что теплообмен при кипении можно описать безразмерными числами подобия, такими как Nu , Pr , и параметром K , отвечающим за особенности теплообмена при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости:

$$Nu^* = C_{sf}^* K^m Pr^n, \quad (15)$$

где

$$K = \frac{q}{h_{LG} \rho_V^{0.5} [\sigma g (\rho_L - \rho_V)]^{0.25}}$$

Значения n и C_{sf}^* определяются по экспериментальным данным. В [12–15] значение m принималось равным $2/3$, в настоящей работе при

Таблица 2. Значения средней ошибки и среднеквадратического отклонения для расчетных зависимостей (1) и (2)

h , мм	$MAError$, %			$RMSError$, %		
	p , кПа					
	50	100	150	50	100	150
1.5	132/31	24/1026	—/—	148/49	283/133	—/—
2.5	36/—19	28/—18	—/—	38/22	32/21	—/—
6.0	62/—0.1	58/8	82/30	106/54	63/21	85/38
10.0	37/—14	37/—4	36/—5	43/22	46/22	44/10
16.0	38/—12	44/—	25/—12	45/19	74/45	29/14
25.0	42/—11	23/—15	26/—9	48/17	24/18	33/20
35.0	42/11	32/—6	26/—10	48/17	44/25	30/15

Примечание. В числителе значения, рассчитанные по зависимости (1), в знаменателе — по зависимости (2).

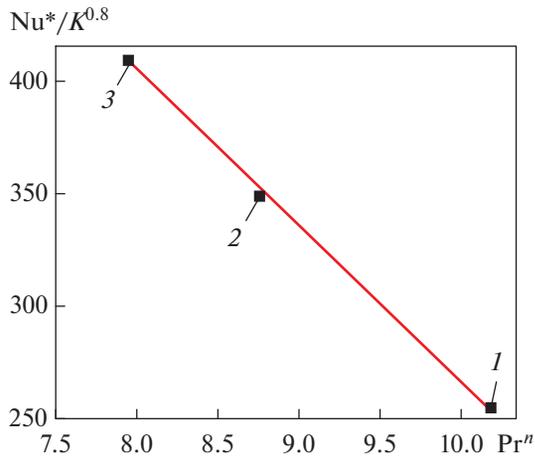


Рис. 4. Зависимость $Nu^*/K^{0.8} = Pr^n$ для вычисления коэффициента C_{sf}^* и степени n при числе Прандтля в выражении (16) при давлении 50 (1), 100 (2) и 150 кПа (3)

обобщении экспериментальных данных для НФЕ-7100 значение параметра m в соотношении (15) было принято равным 0,8, как в зависимости (2). Для обобщения автор [10] выбрал наиболее, по его мнению, достоверные экспериментальные данные различных авторов и показал, что значение показателя степени m больше, чем диапазон 0,6–0,7, предложенный в [24]. В результате был использован следующий вид зависимости (15):

$$Nu^* = C_{sf}^* K^{0.8} Pr^n. \quad (16)$$

При подборе параметра C_{sf}^* для каждого давления в отдельности вычисляли параметр C_i из соотношения $Nu^* = C_i K^{0.8}$ для всех высот слоя жидкости. Затем для полученных значений C_i с помощью соотношения $Nu^*/K^{0.8} = C_{sf}^* Pr^n$ рассчитывали параметр C_{sf}^* и показатель степени n для числа Прандтля, с помощью которого учитываются изменения теплофизических свойств жидкости, соответствующие изменению температуры насыщения вследствие увеличения или уменьшения давления. На рис. 4 видно, что скорректированная зависимость (16) $Nu^*/K^{0.8} = C_{sf}^* Pr^n$ имеет однозначно определенные значения параметров n и C_{sf}^* : $n = -1.9$, $C_{sf}^* = 20\,445$.

Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от теплового потока q при кипении диэлектрической жидкости НФЕ-7100 на поверхности из нержавеющей стали при давлении в рабочей камере 50 (а), 100 (б) и 150 кПа (в) в сравнении с результатами расчета по зависимости (17). Точность сравнения, %: 8 – (+25); 9 – (–25); 10 – (+30); 11 – (–30). Остальные обозначения см. рис. 2

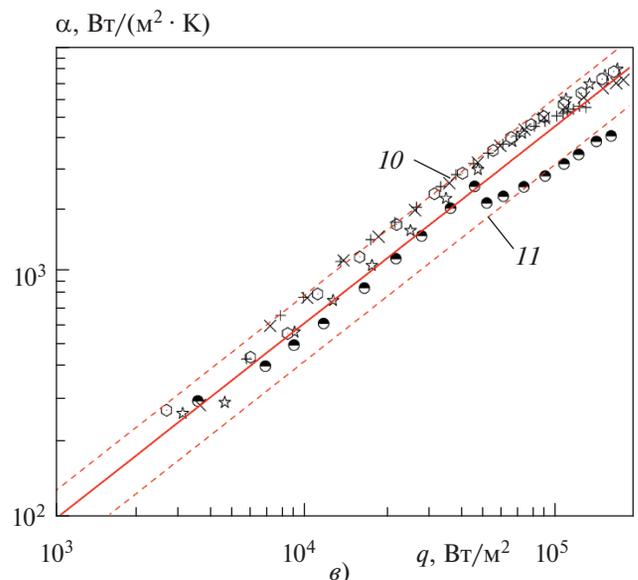
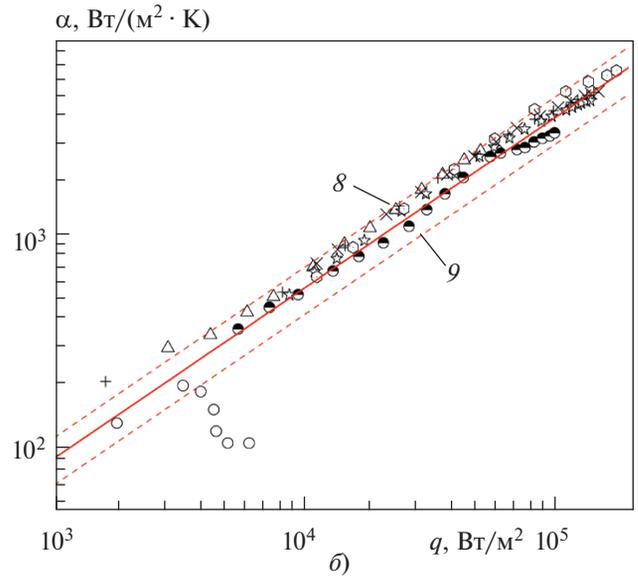
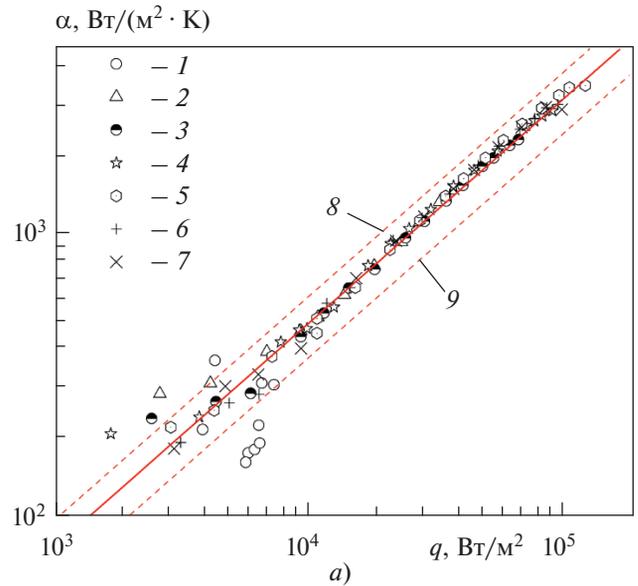


Таблица 3. Значения средней ошибки и среднеквадратического отклонения для эмпирической зависимости (17)

<i>h</i> , мм	<i>MAError</i> , %			<i>RMSError</i> , %		
	<i>p</i> , кПа					
	50	100	150	50	100	150
1.5	52	110	–	68	141	–
2.5	–7	–15	–	14	18	–
6.0	15	12	25	65	24	34
10.0	–1	–0.2	–8	18	22	12
16.0	1	6	–15	17	47	16
25.0	3	–12	–12	15	15	21
35.0	3	–3	–13	15	25	17

Теплофизические свойства жидкости, учитываемые числом Прандтля, зависят от давления, поэтому параметр C_{sf}^* и показатель степени n учитывают влияние давления. Показатель степени для числа Прандтля оказался такой же, как и полученный для n -додекана в работе [5], а значение коэффициента C_{sf}^* для HFE-7100 – примерно в 3 раза больше, чем $C_{sf} = 7933$, определенное для n -додекана [5]. В работе [12] для обобщения экспериментальных данных по кипению для органической жидкости n -гептана автор получил значения $C_{sf}^* = 13330$ и $n = -2$, которые имеют тот же порядок, что и у HFE-7100 и n -додекана.

Для HFE-7100 с использованием соотношения (16) выведена следующая зависимость, обобщающая экспериментальные данные:

$$\frac{\alpha l_{\sigma}}{\lambda_L} = 20445 \left\{ \frac{q}{h_{LG} \rho_V^{0.5} [\sigma g (\rho_L - \rho_V)]^{0.25}} \right\}^{0.8} \text{Pr}^{-1.9}. \quad (17)$$

Результаты сравнения расчетной зависимости (17) с экспериментальными данными приведены на рис. 5.

В табл. 3 представлены данные по средней ошибке (12) и среднеквадратическому отклонению (14) коэффициентов теплоотдачи, полученных при проведении эксперимента и рассчитанных по зависимости (17) [12–15].

Несмотря на то что зависимость (17) хорошо обобщает экспериментальные данные, следует отметить, что используемая зависимость (4) является эмпирической. При ее построении Пиоро не рассматривал физические модели, отражающие конкретные физические особенности процесса кипения жидкостей в тонких горизонтальных слоях. При изменении условий проведения эксперимента (рабочей жидкости, приведенного давления, параметров поверхности кипения)

данная зависимость требует тщательного подбора параметра C_{sf}^* и показателя степени n для числа Прандтля, с помощью которого учитывается изменение теплофизических свойств жидкости при изменении давления. В данном случае, очевидно, следует учитывать, в первую очередь, изменение вязкости жидкости, влияние которой может проявляться при ее кипении в тонких горизонтальных слоях на протяженной поверхности. Можно предположить, что в реализуемых условиях эксперимента подток жидкости со стенок термосифона на теплоотдающую поверхность значительных размеров может оказывать существенное влияние на развитие термогидродинамических процессов при кипении и, соответственно, на коэффициенты теплоотдачи. Однако в число Прандтля входит и коэффициент теплопроводности. Показатель степени при числе Прандтля для органических жидкостей (n -гептан, n -додекан, HFE-7100) по результатам проведенных обобщений равен примерно -2 . В таком случае коэффициент теплоотдачи пропорционален коэффициенту теплопроводности в третьей степени ($\alpha \sim \lambda^3$), что, несомненно, с физической точки зрения абсолютно некорректно. В теоретических и полуэмпирических зависимостях значение показателя степени при числе Прандтля близко к $1/3$. Поэтому очевидно, что в некоторых случаях использование зависимости (4) может быть проблематичным, в особенности когда число Прандтля изменяется в широких пределах вследствие невязкости, а, главным образом, теплопроводности (например, при кипении жидких металлов).

ВЫВОДЫ

1. В результате экспериментов при кипении в тонких горизонтальных слоях диэлектрической жидкости HFE-7100 показано, что при давлениях 50, 100 и 150 кПа расчетная зависимость Гогонина хорошо обобщает экспериментальные данные при изменении безразмерной высоты слоя от 1.88 до 43.75. Также эта расчетная зависимость хорошо обобщает экспериментальные данные, полученные в области умеренных приведенных давлений $0.001 < p/p_{cr} < 0.05$ при кипении n -додекана в интервале безразмерных высот слоя от 0.99 до 23.22.

2. Зависимость Ягова для кипения диэлектрической жидкости HFE-7100 в тонких горизонтальных слоях хорошо обобщает данные, полученные в области низких ($p/p_{cr} < 0.001$) приведенных давлений при испарении/кипении тонких пленок n -додекана безразмерной высотой слоя менее 5.81, когда основной вклад в теплообмен вносит испарение.

3. Модификация зависимости Пиоро позволила с удовлетворительной точностью обобщить экспериментальные данные во всех диапазонах

изменения давления и высоты слоя диэлектрической жидкости HFE-7100. Полученная зависимость дает возможность провести расчет с точностью $\pm 25\%$ для умеренных приведенных давлений $0.001 < p/p_{cr} < 0.05$ и с точностью $\pm 30\%$ для более высоких приведенных давлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Leong K.C., Ho J.Y., Wong K.K.** A critical review of pool and flow boiling heat transfer of dielectric fluids on enhanced surfaces // *Appl. Therm. Eng.* 2017. V. 112. P. 999–1019.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.138>
2. **Liang G., Mudawar I.** Review of pool boiling enhancement by surface modification // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2019. V. 128. P. 892–933.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.026>
3. **Enhanced pool boiling of dielectric and highly wetting liquids – A review on surface engineering / U. Sajjad, A. Sadeghianjahromi, H.M. Ali, C.C. Wang // Appl. Therm. Eng.** 2021. V. 195. P. 117074.
4. **Energy saving potential analysis of two-phase immersion cooling system with multi-mode condenser / C. Zhang, X. Sun, Z. Han, X. Li, J. Dong // Appl. Therm. Eng.** 2023. V. 219. P. 119614.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119614>
5. **Heat transfer during evaporation/boiling of horizontal layers of liquid at low pressure / A.E. Brester, D.A. Shvetsov, V.I. Zhukov, A.N. Pavlenko // J. Eng. Thermophys.** 2023. V. 32. No. 3. P. 415–445.
<https://doi.org/10.1134/S1810232823030025>
6. **Brester A., Zhukov V., Pavlenko A.** Influence of liquid layer height on evaporation/boiling heat transfer under low pressure conditions // *E3S Web Conf.* 2023. V. 459. P. 05001.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345905001>
7. **Ягов В.В.** Теплообмен при развитии пузырькового кипения жидкостей // *Теплоэнергетика.* 1988. № 2. С. 4–9.
8. **Yagov V.V.** Generic features and puzzles of nucleate boiling // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2009. V. 52. P. 5241–5249.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.071>
9. **Лабунцов Д.А.** Вопросы теплообмена при пузырьковом кипении жидкости // *Теплоэнергетика.* 1972. № 9. С. 14–19.
10. **Gogonin I.I.** The dependence of boiling heat transfer on the properties and geometric parameters of heat-transfer wall // *High Temp.* 2006. V. 44. No. 6. P. 913–921.
<https://doi.org/10.1007/s10740-006-0110-3>
11. **Гогонин И.И.** Теплообмен при пузырьковом кипении. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018.
12. **Pioro I.L.** Boiling heat transfer characteristics of thin liquid layers in a horizontally flat two-phase thermosyphon // *Preprints of the 10th Intern. Heat Pipe Conf. Stuttgart, Germany, 1997.* P. 1–5.
13. **Pioro I.L.** Experimental evaluation of constants for the Rohsenow pool boiling correlation // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 1998. V. 42. P. 2003–2013.
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(98\)00294-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(98)00294-4)
14. **Pioro I.L., Rohsenow W., Doerffer S.S.** Nucleate pool-boiling heat transfer. I: Review of parametric effects of boiling surface // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2004. V. 47. P. 5033–5044.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.06.019>
15. **Pioro I.L., Rohsenow W., Doerffer S.S.** Nucleate pool-boiling heat transfer. II: Assessment of prediction methods // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2004. V. 47. P. 5045–5057.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.06.020>
16. **Zhukov V.I., Pavlenko A.N.** Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2018. V. 117. P. 978–990.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.060>
17. **Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A.** The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in horizontal liquid layers of various heights on a microstructured surface produced by 3D laser printing // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2020. V. 163. P. 120488.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120488>
18. **Oleinik B.P., Surin V.G., Petrova O.K.** Research of heat conductivity of stainless and low-carbon steels // *High Temp.* 1985. V. 23. No. 3. P. 500–505.
19. **3M™ Novac™** engineered fluid HFE-7100 physical properties. 2002.
20. **Density, surface tension, and kinematic viscosity of hydrofluoroethers HFE-7000, HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300, and HFE-7500 / M.H. Rausch, L. Kretschmer, S. Will, A. Leipertz, A.P. Fröba // J. Chem. Eng. Data.** 2015. V. 60. No. 12. P. 3759–3765.
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00691>
21. **Lee J., Mudawar I.** Fluid flow and heat transfer characteristics of low temperature two-phase micro-channel heat sinks – Part 1: Experimental methods and flow visualization results // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2008. V. 51. No. 17–18. P. 4315–4326.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.012>
22. **Shukla M.Y., Kandlikar S.G.** Influence of liquid height on bubble coalescence, vapor venting, liquid return, and heat transfer in pool boiling // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2021. V. 173. P. 121261.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121261>
23. **Кутателадзе С.С.** Гидромеханическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // *ЖТФ.* 1950. Т. 20. № 11. С. 1389–1392.
24. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. 5-е изд. М.: Атомиздат, 1979.

Nucleate Boiling Heat Transfer of Dielectric Liquid HFE-7100 in Horizontal Layers at Various Pressures

A. E. Brester^{a, b, *}, D. A. Shvetsov^{a, b}, V. I. Zhukov^{a, b}, and A. N. Pavlenko^a

^a Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

^b Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia

*e-mail: brester94@gmail.com

Abstract—Experimental data are presented on nucleate boiling heat transfer of dielectric liquid HFE-7100 in horizontal layers. The liquid layer height was varied in a wide range while changing the pressure in the working chamber. The experiments were performed on a flat surface of a 120-mm outer diameter stainless-steel plate in an experimental heat-transfer vacuum setup whose working chamber was a thermal syphon. The experimental data were compared with the Yagov and Gogonin correlations which had been obtained for pool boiling. The Gogonin correlation has been demonstrated to properly generalize the experimental data in all ranges of reduced pressures and liquid layer heights. This correlation explicitly describes the influence of such parameters as the heating surface roughness and the ratio of the thermophysical properties of the liquid and the heat-transfer wall, which have a pronounced effect on the heat-transfer coefficient during boiling of dielectric liquids. Besides, this correlation is convenient since it can be used with parameters that can be monitored during the experiment. A generalization is presented of experimental data by the Piro empirical correlation recommended for generalizing data on nucleate boiling in thin liquid layers. It has been demonstrated that the Piro correlation with carefully selected coefficients and power exponents can generalize with an acceptable accuracy the experimental data obtained under given conditions on a heat-transfer wall exposed to a working fluid. To quantitatively assess the agreement between the computational correlations and experimental data on nucleate boiling of dielectric liquid HFE-7100 in horizontal layers, the mean error and rms deviation were used.

Keywords: dielectric liquid HFE-7100, thin liquid layer, heat transfer, boiling, reduced pressure, heat-transfer vacuum setup, mean error, rms deviation